

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Lichtneger, Petr; Mathias, Andreas; Horten, Theresa

Vergleich des numerischen und physikalischen Modells der Strömungsstruktur an einer negativen Sohlstufe

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103848>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lichtneger, Petr; Mathias, Andreas; Horten, Theresa (2006): Vergleich des numerischen und physikalischen Modells der Strömungsstruktur an einer negativen Sohlstufe. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Strömungssimulation im Wasserbau (Flow Simulation in Hydraulic Engineering). Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 32. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 493-500.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Vergleich des numerischen und physikalischen Modells der Strömungsstruktur an einer negativen Sohlstufe

Petr Lichtneger, Andreas Mathias, Theresa Horten

Im hier präsentierten Konferenzbeitrag wird ein Vergleich von numerischen Berechnungen mit den Ergebnissen aus Modellversuchen durchgeführt. Für die Versuche wurde ein geschlossener Strömungskanal (Druckströmung), der sich vom Rechteckquerschnitt $5H \times 4H$ zum Quadratquerschnitt $5H \times 5H$ sprungweise ausbreitet, ausgewählt. Neben der Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten wurde besonderes Augenmerk auf die Wirbelfrequenzen bzw. die Frequenzspektren gerichtet.

This paper presents a comparison of several numerical computations with measurements that were carried out on a physical model of a backward-facing-step flow. The inlet cross-section dimensions were $5H \times 4H$ and the outlet ones $5H \times 5H$. The basic parameters of water flow separation as well as the frequency of the shedding vortices were investigated.

1 Einleitung

In Zeiten gestiegenen Kostenbewusstseins ist es bei der Planung wasserbaulicher Anlagen besonders wichtig, numerische Berechnungsverfahren zur Hand zu haben, mit denen sich zuverlässig und schnell Strömungsvorgänge und -strukturen abbilden lassen. Gute Kenntnisse der Strömungscharakteristik an wasserbaulichen Anlagen können dem Planer helfen, diese Anlagen hinsichtlich ihrer hydraulischen Leistungsfähigkeit zu optimieren. Aufgrund der geometrischen Einfachheit ist eine negative Sohlstufe für die Verifizierung eines numerischen Modells sehr geeignet. Diese einfache Geometrie zeichnet sich durch eine komplizierte Strömungsstruktur aus. An der Stufenkante löst sich die entstehende Scherschicht ab, um sich dann in einer Entfernung x_f von der Sohlstufe wieder an die Sohle anzuheften. Die Abb. 1 stellt alle charakteristischen Parameter eines Ablösevorganges an einer negativen Sohlstufe dar.

Die Strömung in der Ablösezone und am Übergang von der Haupt- zur Rückströmung ist instationär bzw. quasi-stationär. Hinter der Stufenkante kommt es zur Entstehung der sog. Kelvin-Helmoltz-Instabilitäten (KH-Instabilität), die aufgrund der Berührung zweier Schichten mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten entsteht (Abb. 2). Die Struktur der KH-Instabilität, sowie die

Länge der primären Rezirkulation x_r sind von der Reynoldszahl und der Grenzschichtstruktur (δ_0) abhängig [1], [2].

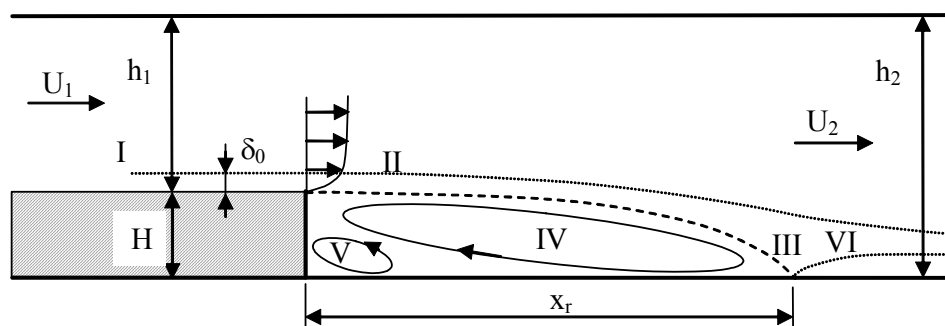


Abbildung 1 Strömungsstruktur an einer negativen Sohlstufe; entstehende (I) und abgelöste Grenzschicht (II) der Anfangshöhe δ_0 , ihre Wiederanhaftung (III), primäre Rezirkulation (IV) der Länge x_r , Eckenwirbel (V), wieder entstehende Grenzschicht (VI), U - mittlere Geschwindigkeit, H - Stufenhöhe

Dieser Beitrag beschreibt und bewertet physikalische und numerische Modellversuche zur Abbildung einer Strömungsstruktur in einem geschlossenen, sich sprungweise ausbreitenden Rechteckkanal (negative Sohlstufe der Höhe $H = 40\text{mm}$). Weil es sich um räumliche Strömungsvorgänge handelt, wurden alle numerischen Modelle dreidimensional unter Festsetzung von Randbedingungen definiert und gerechnet. Für die weitere Auswertung wurde die zweidimensionale Strömung in der Symmetrieebene des Kanals betrachtet.

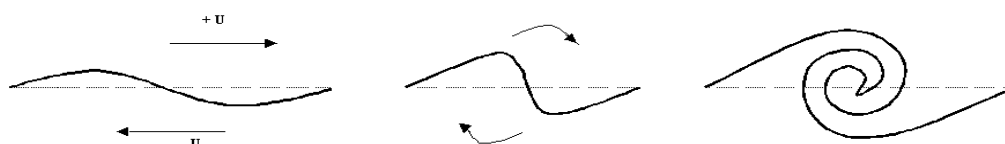


Abbildung 2 Kelvin-Helmoltz-Instabilität

2 Physikalisches Modell

Die hier dargestellten Versuche wurden z. T. an der TU Brno und an der TU Dresden durchgeführt, weitere zusammenhängende Ergebnisse enthalten auch [3], [5], [6], [7].

Das zu untersuchende physikalische Modell der negativen Sohlstufe wurde im Wasserlabor des Instituts für Wasserwirtschaft und Wasserbau an der TU Brno aufgebaut. Die berührungslose Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im physikalischen Modell erfolgte mittels LDA (Laser Doppler Anemometry) und PIV (Particle Image Velocimetry). Um eine optimale Einsetzbarkeit der optischen Verfahren gewährleisten zu können, wurde das Modell vollständig aus

durchsichtigem Material (PMMA) hergestellt. Die Geometrie des Modells zeigt die Abb. 3. Das Modell wurde an einen Wasserkreislauf bestehend aus einem Speicher und einer durch einen Frequenzumrichter gesteuerten Pumpe angeschlossen. Die Druckverhältnisse wurden durch einen am Auslauf befindlichen Schieber gesteuert. Im Einlaufbereich wurden zur Strömungsberuhigung Siebe und Wabenelemente eingebaut.

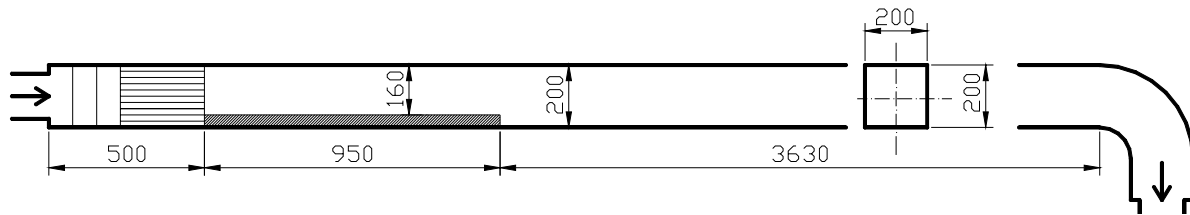


Abbildung 3 Schema des physikalischen Modells

Um Randbedingungen für die numerische Simulation zu definieren und Verifizierungsdaten zu erhalten, wurden folgende Messungen am physikalischen Modell bei einer mittleren Geschwindigkeit von $U_1 = 2,15 \text{ m/s}$ bzw. bei einer Reynoldszahl $Re = (U_1 \times r_{hy,1} / \nu) = 95\,000$ durchgeführt:

- Detaillierte LDA-Messung des Geschwindigkeitsprofils in einem Messpunktnetz $15H$ vor der Stufe und der zugehörigen Turbulenzintensität.
- PIV-Messung in einem axial vertikalen Messschnitt an der Sohlstufe. Die Messergebnisse sollten Aufschluss über die Strömungsstruktur hinter der Sohlstufe geben.
- LDA-Messung im gewählten Messpunkt, $3,5H$ hinter der Stufe und $1H$ über der Sohle in Kanalmitte, um eine Spektralanalyse der Geschwindigkeitskomponenten durchzuführen.
- LDA-Messung, um horizontale Geschwindigkeitskomponenten in mehreren Messpunkten an einer Messlotrechten in Kanalmitte $2,5H$ hinter der Stufe zu bestimmen.

3 Numerische Modelle

Die Sohlstufenströmung wurde numerisch mit Hilfe der Software Fluent und Ansys-CFX mit entsprechenden Randbedingungen stationär (steady), und nicht-stationär (transient) berechnet.

Bei Fluent wurde Large Eddy Simulation (LES) mit dem Smagorinski-Lilly-Modell für die feine (subgrid scale) Turbulenz verwendet [5]. Der in diesem Modell angewendeter Smagorinski-Beiwert wurde nach Erfahrungen mehrerer Autoren von 0,23 auf 0,1 erniedrigt. Als Einlaufrandbedingung wurde eine im

Querschnitt zufällig generierte Geschwindigkeitsverteilung nach Gauß mit einer mittleren Geschwindigkeit und ihrer Standardabweichung ($Tu \cong 5\%$) definiert, ohne die Turbulenzintensitätsverteilung im Profil zu berücksichtigen. Das unsymmetrische, im Bereich der Ablösezone und an der Wand vor der Stufenkante verfeinerte, rechteckige Berechnungsnetz wurde mit 2 Mio. Elementen (Netz-1) erstellt. Der Einlaufbereich vor der Stufe wurde mit $15H$, der Auslaufbereich nach der Stufe mit $35H$ definiert. Der Berechnungszeitschritt wurde mit $0,001$ s gewählt.

Mit Ansys-CFX wurden beide Berechnungsvarianten (stationär und nicht stationär) durchgerechnet. Anfangs wurde ein einfaches Tetraeder-Berechnungsnetz von 40 Tsd. Elementen (Netz-2) generiert und teilweise im Bereich der Stufe verfeinert. Die Einlaufrandbedingung wurde mit $15H$ vor der Stufe und die Auslaufrandbedingung mit $50H$ hinter der Stufe festgelegt. Bei gleichen Randbedingungen wurden folgende Turbulenzmodelle ausgewählt:

- Standard K- ε Modell (KEM)
- BSL Reynolds Stress Modell (BSL-RSM)
- SSG Reynolds Stress Modell (SSG-RSM)

Alle relevanten Modellbeiwerte und Koeffizienten wurden ohne Änderung als Defaultwerte des Systems belassen.

Für weitere Berechnungen in CFX wurde das Netz-2 auf einen Wert von 1,4 Mio. Elemente (Netz-3), vor allem im Bereich der Ablösezone und an allen Wänden verfeinert. Das Netz-3 wurde zunächst zur stationären Berechnung mit KEM verwendet. Im nächsten Schritt wurde das Ergebnis aus der stationären KEM-Berechnung als Anfangsrandbedingung für eine nichtstationäre Berechnung mit RSM eingesetzt.

4 Auswertung und Vergleich

Die Tab. 1 vergleicht die Länge x_r der Ablösezone und die Geschwindigkeitsverteilung (Kriterium Z) zwischen den empirisch ermittelten und den numerisch berechneten Werten. Das Z-Kriterium wird definiert als:

$$Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i - u_{i,LDA}|, \quad (1)$$

wo u_i die berechneten und $u_{i,LDA}$ die gemessenen Mittelwerte der horizontalen Geschwindigkeitskomponente in n gewählten Punkten an der betrachteten Messlotrechte (Abb. 4) sind.

Bei der nicht stationären LES wurden nur die letzten 1000 Zeitschritte aufgenommen. Die Aufnahme startete nach der achtfachen Zeitdauer, die das Wasser zum Durchfließen des Wechselbereichs brauchte. Außer den mittleren Geschwindigkeiten wurde das Frequenzspektrum der senkrechten Geschwindigkeitskomponente im gewählten Punkt 5H hinter der Stufenkante ausgewertet und mit dem von der LDA-Messung bestimmten Spektrum verglichen (Abb. 5). Das Frequenzspektrum, bzw. die eindimensionale spektrale Leistungsdichte $S(f)$ kann definiert werden als:

$$S(f) \sim \int R(\tau) \cdot \cos(2\pi f\tau) d\tau, \quad (2)$$

wo $R(\tau)$ die Korrelationsfunktion der gemessenen Geschwindigkeitskomponente $u(t)$, resp. $v(t)$ ist. Zur Bestimmung der Frequenzspektren wurde im Fall der äquidistanten Geschwindigkeitsganglinie bei der LES diskrete Fourier-Transformation, im Fall der unäquidistanten Ganglinie bei der LDA-Messung das Verfahren nach [4] verwendet. Der Vergleich (Abb. 5) zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung. Das Turbulenzenergiegefälle von ca. $f^{5/3}$ entspricht der isotropen Turbulenz bzw. dem universellen Gleichgewicht. Nach der Messung ergibt sich die dominante Frequenz von 12,5 Hz. Das Frequenzspektrum bei der LES enthält keine signifikante dominante Frequenz, die von der KH-Instabilität herrühren könnte. Trotzdem ist anhand der berechneten Geschwindigkeitsstruktur (Abb. 6) ersichtlich, dass sich hier eine KH-Instabilität entwickelt. Der Energietragende Bereich reicht bis zu einer Frequenz von rund 20 Hz. Zu beachten ist hier der Unterschied zwischen den von der LDA-Messung bestimmten Spektren der vertikalen und der horizontalen Geschwindigkeitskomponente.

Tabelle 1 Vergleich der Ergebnisse anhand des Z-Kriteriums und x_r
*) Berechnungsnetz-3

	Z	x_r / H
Daten von:	m/s	-
LDA (Experiment)	0	5,4
KEM	0,22	5,1
BSL-RSM	0,27	5
SSG-RSM	0,34	4,5
LES	0,10	5,4
KEM*)	0,08	6,7

Die stationäre KEM-Berechnung mit dem Netz-3 hat schnell konvergiert. Die mittleren Geschwindigkeiten stimmten mit den experimentell ermittelten Werten noch besser überein als die von der LES (Tab 1). Eine höhere Auflösung des Berechnungsnetzes führte zu einer signifikanten Verbesserung des Z-Kriteriums. Die Länge der Rezirkulation wurde jedoch erheblich überschritten. Die geplante

nicht stationäre Berechnung mit dem Netz-3 in CFX konnte leider nicht rechtzeitig vor Redaktionsschluss erfolgen.

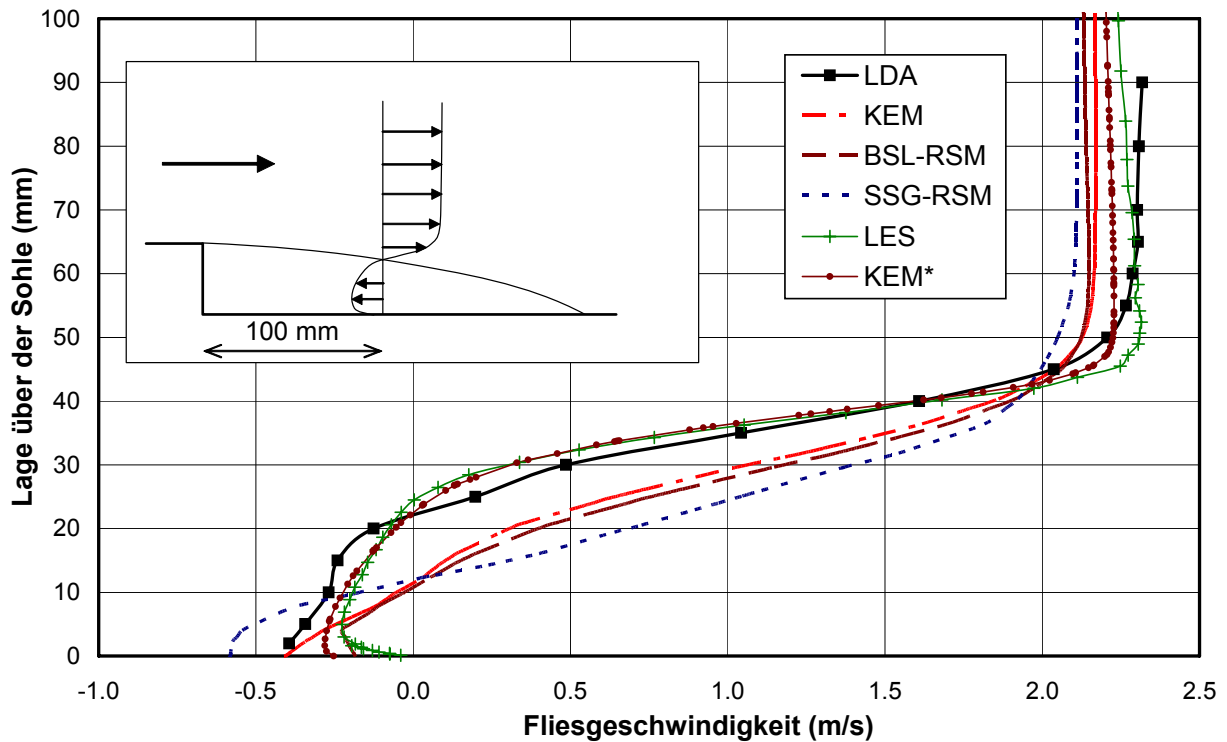


Abbildung 4 Geschwindigkeitsverteilung an einer Senkrechten 100 mm hinter der Stufe
*) Berechnungsnetz-3

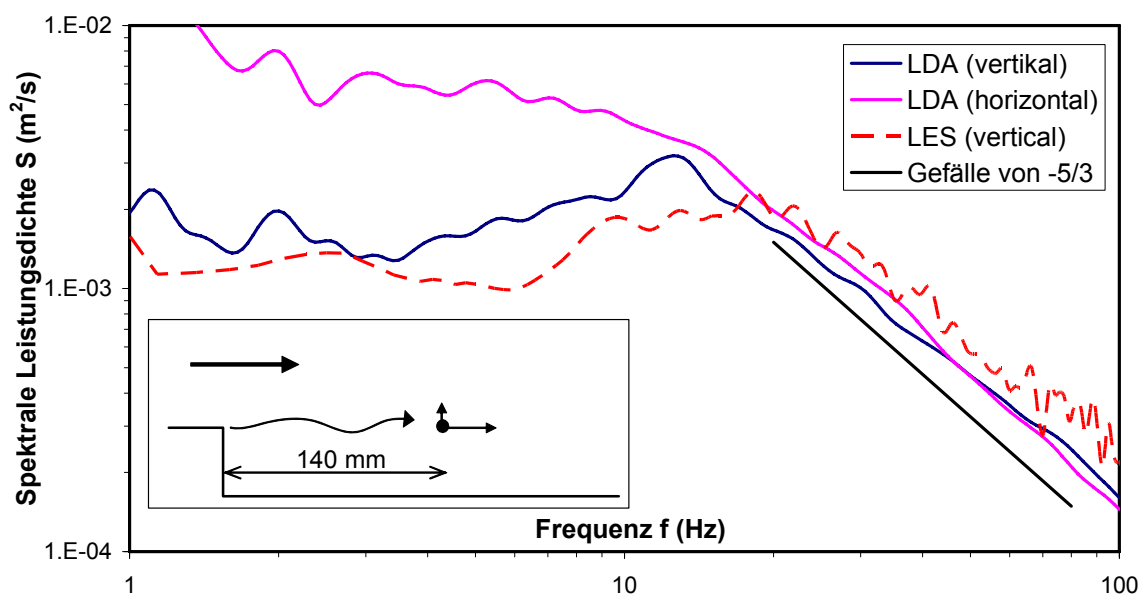


Abbildung 5 Eindimensionale Frequenzspektren der vertikalen und horizontalen Geschwindigkeitskomponente im Messpunkt 3,5H hinter der Stufenkante

5 Schlussfolgerung

Dieser Beitrag behandelt einen Teil der umfangreichen Problematik der Sohlstufenströmung und überprüft einige Simulationsmöglichkeiten aus der Sicht des Anwenders. Anhand der am physikalischen Modell (Abb. 3, 7) ermittelten Randbedingungen wurden anschließend numerische Berechnungen unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Turbulenzmodelle bei einer Reynoldszahl durchgeführt. Bezüglich der Mittelwerte hat das klassische $k-\varepsilon$ Modell bei gleichen Randbedingungen, vor allem bei hoher Netzauflösung eine gute Übereinstimmung aufgewiesen (Tab. 1, Abb. 4). Anspruchsvollere LES [5] entspricht im Fall der mittleren Geschwindigkeiten sowie im Fall der Wirbelfrequenzen am ehesten den empirisch ermittelten Werten. Die Abb. 5 präsentiert eine gute Übereinstimmung im Frequenzbereich. Die Ergebnisse von der LES dokumentieren auch die KH-Instabilität (Abb. 6). Mit PIV wurde hinter der Sohlstufe ein Eckenwirbel eindeutig aufgenommen, aber keine der numerischen Berechnungen hat diesen Eckenwirbel nachgewiesen. Mit einer höheren Netzauflösung im Eckenbereich könnte vermutlich dieser berechnet werden, was in weiteren Versuchen zu beweisen ist. Weiterführende Ergebnisse werden im Laufe des Kolloquiums in der Postersession präsentiert.

Das physikalische Modell einer negativen Sohlstufe und die durchgeführten Messungen unter Anwendung der LDA- und PIV-Messtechnik an der TU Brno wurden von der Tschechischen Grantagentur im Rahmen des Projektes der Reg.-Nr.: 101/03/0018 „Untersuchung der turbulenten Scherströmung in Kanälen mit sich sprungweise ausbreitenden Querschnitten“ unterstützt.

Die Autoren bedanken sich auch beim Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Aigner, Institut für Wasserbau und THM der TU Dresden, für die Hilfe bei der Inanspruchnahme der Rechenressourcen der TU Dresden.

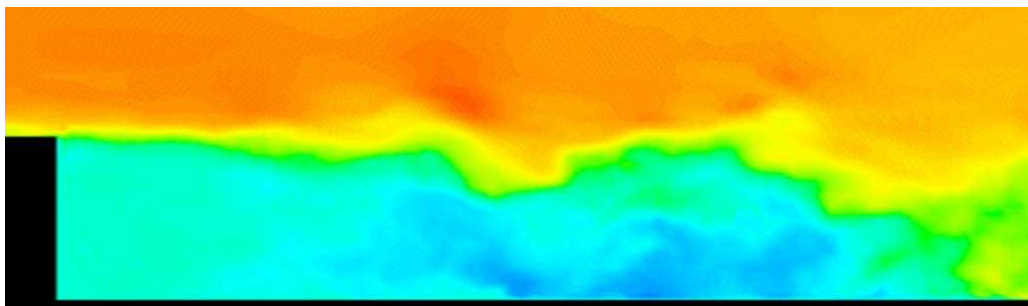


Abbildung 6 Ein Zeitschritt von der LES [5], horizontale Geschwindigkeitskomponente

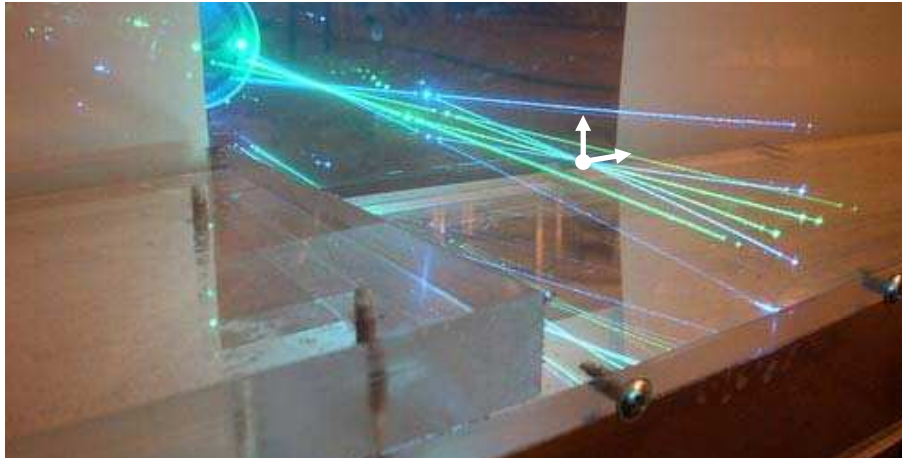


Abbildung 7 LDA-Messung

Literatur:

- [1] ARMALY, B.F., Durst, F., PEREIRA, J.C.F., SCHÖNUNG, B.: Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow. In. J. Fluid Mech. vol. 127, S. 473-496, 1983
- [2] JONAS, P.: Kommentar zur Auswirkung der Turbulenz auf die Strömungsablösung / Poznamka k vlivu turbulence na odtrzeni proudeni. In. Topical Problems of Fluid Mechanics 2005. Institute of Thermomechanics AS CR, Prague 2005, 47-50. ISBN 80-85918-92-7
- [3] LICHTNEGER, P.: Messung der Strömungsstruktur an einer negativen Sohlstufe unter Anwendung der LDA. Abschlussbericht vom Forschungsaufenthalt am IWD, TU Dresden. LVV, TU Brno 2004.
- [4] NOBACH, H.: A global concept of autocorrelation and power spectral density estimation from LDA data sets. In. 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon 2000.
- [5] RUDOLF, P., LICHTNEGER, P.: Large Eddy Simulation Of Backward Facing Step Flow. In. Topical Problems of Fluid Mechanics 2005. Institute of Thermomechanics AS CR, Prague 2005. Pp. 95-98. ISBN 80-85918-92-7
- [6] SULC, J., LICHTNEGER, P., ZUBIK, P.: Flow parameters measurement in the channel with the negative step. In. Engineering Mechanics 2004. Institute of Thermomechanics AS CR, Svatka 2004. ISBN 80-85918-88-9
- [7] ZUBIK, P., SULC, J.: Messung der Strömung im Kanal mit sich sprungweise ausbreitendem Querschnitt / Mereni proudeni v kanalu s nahlym rozsirenim prurezu. In. 4. vodohospodarska konference 2004. CERM, Brno 2004. Str. 579-586. ISBN 80-7204-360-9

Autoren:

Dipl.-Ing. Petr LICHTNEGER, Wasserlabor (LVV) am Institut für Wasserwirtschaft und Wasserbau der TU Brno, Laborator vodohospodarskeho vyzkumu, Veveri 95, CZ - 60200 Brno,
Tel.: +420541147287, Fax: +420541147288, Email: lichtneger.p@centrum.cz, www.lvv.cz
Dipl.-Ing. (FH) Andreas MATHIAS, Hubert-Engels-Labor am Institut für Wasserbau und THM der TU Dresden, Mommsenstrasse 13, D - 01062 Dresden, Tel.: +4935146334685,
Fax: +4935146337124, Email: Andreas.Mathias@tu-dresden.de, www.iwd.tu-dresden.de
cand.-Ing. Theresa HORTEN, Fakultät Frost-, Geo- und Hydrowissenschaften an der TU Dresden